

06;07;12

Фотолюминесценция многослойных структур с квантовыми точками InAs/GaAs в диапазоне длин волн 1.3–1.4 μm

© В.А. Егоров, В.Н. Петров, Н.К. Поляков,
Г.Э. Цырлин, Б.В. Воловик, А.Е. Жуков, В.М. Устинов

Институт аналитического приборостроения РАН, С.-Петербург
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 10 марта 2000 г.

Исследованы оптические свойства многослойных гетероструктур с квантовыми точками в системе InAs/GaAs, полученных комбинацией методов молекулярно-пучковой эпитаксии и субмонослойной миграционно-стимулированной эпитаксии. Показана возможность получения в таких структурах фотолюминесценции с максимумом излучения в диапазоне длин волн 1.3–1.4 μm при комнатной температуре.

Создание лазерных диодов с длиной волны генерации 1.3 μm является актуальной задачей для их применения в волоконно-оптических локальных линиях связи. Это связано с тем, что на данной длине волны наблюдается наименьшая дисперсия сигнала в современных оптоволоконных материалах. Возможны несколько подходов для решения этой задачи: выращивание полупроводниковых соединений A^3B^5 на подложках фосфида индия [1], а также на подложках GaAs при использовании квантовых точек (КТ) в качестве активной области: использование разновидностей метода молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) для получения активной области, состоящей из InGaAs КТ [2], внедрение небольшого количества азота в InGaAs КТ [3], заращивание КТ InAs/GaAs слоем твердого раствора InGaAs [4,5] и т. д. Недавно нами была продемонстрирована принципиальная возможность достижения длины волны излучения фотолюминесценции (ФЛ) 1.3 μm в многослойных структурах, содержащих InAs КТ, полученных комбинированными методами на основе МПЭ [6]. Так, на структуре, содержащей 10 слоев, каждый из которых содержал 2.5 монослоя (МС) InAs КТ, выращенных по схеме 0.5 МС методом МПЭ + 2.0 МС методом субмонослойной

миграционно-стимулированной эпитаксии (СМСЭ) [7], и разделенных 8 nm GaAs спейсером, реализовано ФЛ излучение с максимумом при 1.3 μm при комнатной температуре. В связи с тем что генерация в лазерных структурах возможна через возбужденное состояние КТ, представляется актуальным получение структур с большей длиной волны излучения. Возможно также, что это позволит реализовать лазерную генерацию на длинах волн вплоть до 1.55 μm . В данной работе нами продемонстрирована возможность увеличения длины волны излучения ФЛ вплоть до 1.4 μm при комнатной температуре на основе многослойных структур с КТ InAs/GaAs, полученных комбинацией методов МПЭ и СМСЭ.

Исследуемые структуры были получены на установке ЭП1203 на полуизолирующих сингулярных GaAs (100). Формирование КТ контролировалось по картине дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с помощью системы регистрации и анализа картин ДБЭО [8]. Активный слой КТ выращивался по следующей методике: первые 0.5 МС InAs методом МПЭ для получения корругированной поверхности [9] в целях получения большой плотности центров образования трехмерных островков, последующие 1.7–2.0 МС InAs — методом СМСЭ, при котором потоки индия и мышьяка направлялись на поверхность подложки последовательно. В каждом случае производилось 4 цикла осаждения. Один цикл осаждения атомов индия соответствовал напылению 0.4–0.5 МС, после каждого цикла поверхность выдерживалась в потоке мышьяка в течение 10 s. Во время напыления индия наблюдалась реконструкция поверхности (4×1), во время выдержки поверхности под мышьяком сверхструктура вначале изменялась на (1×1), а после напыления 2 МС InAs на тяжах образовывались объемные рефлексы, свидетельствующие об образовании трехмерных островков. Активная область, помещенная между слоями GaAs толщиной 6 nm с каждой стороны, состояла из десяти слоев InAs квантовых точек, разделенных спейсерами GaAs толщиной 8–10 nm. Для различных структур эффективная толщина слоя InAs в одном слое КТ изменялась от 2.2 до 2.5 МС. Для предотвращения транспорта неравновесных носителей при проведении оптических исследований в приповерхностную область и в область подложки активная область ограничивалась с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ (5 пар, 25A/25A). Сверху структура покрывалась слоем GaAs толщиной 5 nm. Температура роста составляла 470–480°C для активной области и

Номера образцов, их технологические параметры и положения максимумов пиков ФЛ при комнатной температуре наблюдения

Номер образца	Количество слоев КТ	Количество МС InAs в КТ	Толщина спейсера, Å	Позиция пика (пиков) ФЛ, μm
1	10	2.5	100	1.15–1.28
2	15	2.2	80	1.34
3	15	2.5	80	1.39

600°C для остальной части структуры. Скорости роста, измеренные предварительно на калибровочном образце с помощью методики осцилляции интенсивности ДБЭО в нулевом рефлексе, составляли 0.08–0.1, 0.3 и 0.77 МС/с для InAs, AlAs и GaAs соответственно. Общее давление паров мышьяка в ростовой камере, измеренное с помощью датчика типа ПММ 46, было постоянным при всех экспериментах и составляло $(1.5–2.1) \cdot 10^{-6}$ Ра. Фотолюминесценция возбуждалась Ar⁺-лазером ($\lambda = 514.5$ nm, плотность возбуждения ~ 100 W/cm²). Излучение детектировалось охлаждаемым Ge фотодиодом.

Для исследования влияния различных технологических параметров роста на положение пика ФЛ было выращено несколько многослойных структур, основные характеристики которых представлены в таблице.

Как уже было отмечено в [6], получено эффективное ФЛ излучение при комнатной температуре с максимумом, приходящимся на длину волны 1.3 μm при 10 слоях КТ, разделенных спейсером 80 Å. Известно, что увеличение толщины спейсера, разделяющего слои КТ, уменьшает вероятность образования дислокаций несоответствия, что может приводить к увеличению эффективности ФЛ. На рис. 1 приведены спектры ФЛ образца № 1, спейсер которого был увеличен до 100 Å (в качестве сравнения приведены также спектры ФЛ для образца с 10 слоями КТ, разделенными спейсером 80 Å). Видно, что лишь край линии ФЛ для образца № 1 наблюдается в районе длин волны 1.3 μm , однако максимумы ФЛ излучения приходятся на диапазон длин волн 1.0–1.2 μm , в отличие от образца с меньшей шириной спейсера. Как уже отмечалось ранее, длинноволновый сдвиг в многослойных структурах может быть объяснен возможным образованием конгломератов КТ в верхних рядах вследствие латерального объединения соседних КТ [6]. Можно предпо-

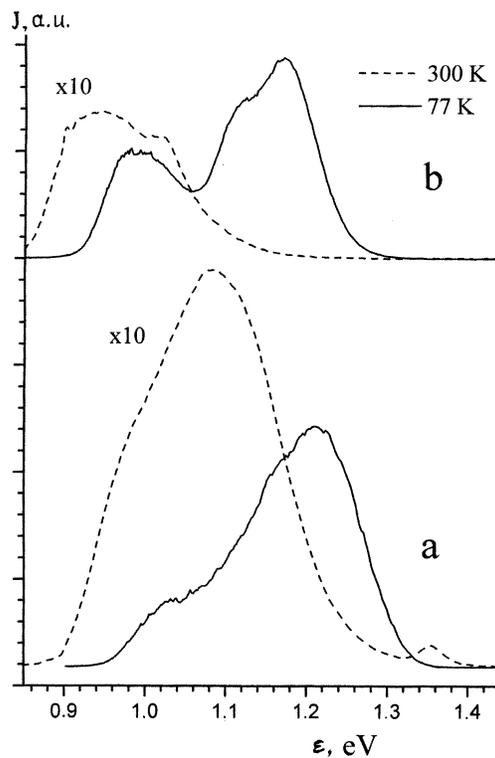


Рис. 1. Спектры ФЛ для структуры с 10 слоями КТ InAs (2.5 нм каждый слой) при температурах наблюдения 77 и 300 К. Толщина спейсера GaAs 100 Å (*a*) и 80 Å (*b*)

ложить, что в случае более широкого спейсера образование подобных конгломератов подавлено. Относительно невысокое уменьшение интенсивности ФЛ излучения при 77 и 300 К (интегрально порядка 5 раз) свидетельствует о высоком кристаллографическом качестве выращенной структуры.

Для того чтобы получить длинноволновый сдвиг положения пика ФЛ, в образце № 2 было увеличено число слоев с КТ до 15 (спейсер 80 Å) при одновременном уменьшении среднего количества InAs в

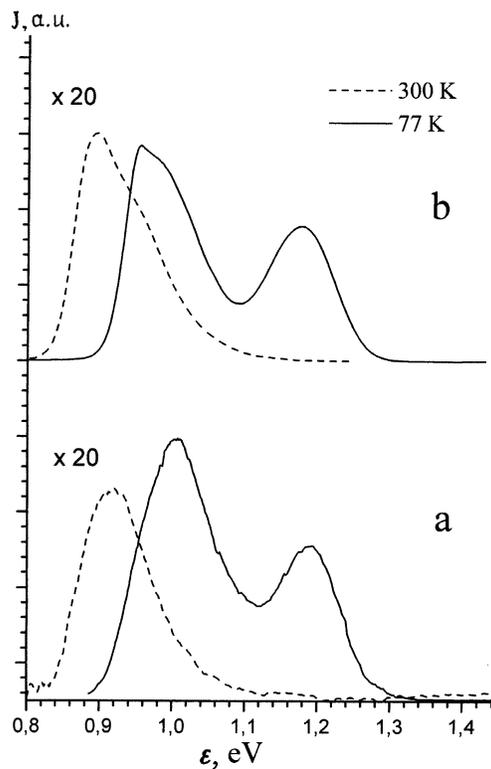


Рис. 2. Спектры ФЛ для структуры с 15 слоями КТ InAs при температурах наблюдения 77 и 300 К и толщиной спейсера GaAs 80 Å. Каждый слой КТ: *a* — 2.2 нм, *b* — 2.5 нм.

каждом слое до 2.2 нм с целью снижения вероятности образования дислокаций. Как было отмечено в [6], увеличение средней толщины InAs и/или уменьшение толщины спейсера приводит к резкому снижению эффективности ФЛ, связанному, по-видимому, с образованием дислокаций несоответствия. На рис. 2, *a* приведены спектры ФЛ, снятые при температурах наблюдения 77 и 300 К для образца № 2. Видно, что максимум ФЛ излучения приходится на длину волны 1.34 мкм, при этом интенсивность ФЛ сохранялась достаточно высокой.

Наибольшее смещение линии ФЛ излучения в длинноволновую область было достигнуто при увеличении количества InAs в КТ с 2.2 до 2.5 МС в каждом слое структуры. На рис. 2, *b* показаны спектры ФЛ образца № 3, снятые при комнатной и азотной температурах наблюдения. Максимум пика ФЛ при 300 К в данном случае приходится на длину волны $1.39 \mu\text{m}$. Несмотря на увеличение средней толщины арсенида индия, эффективность ФЛ осталась достаточно высокой, что, по-видимому, свидетельствует, что и в данном случае плотность дислокаций невелика.

Наблюдаемый длинноволновый сдвиг на структурах с 15 слоями КТ может быть объяснен возможным образованием большей плотности конгломератов КТ в верхних рядах вследствие латерального объединения соседних КТ [10]. В пользу этого факта свидетельствует также характер поведения ансамбля КТ в многослойных структурах, теоретически рассмотренный в [11]. В частности, было показано, что при достаточно малом расстоянии между соседними КТ в начальном слое происходит постепенное слияние соседних КТ на вышележащих слоях. В нашем случае, когда первые 0.5 МС InAs выращивались методом МПЭ (что, как указывалось ранее, приводит к большой плотности центров образования трехмерных островков и соответственно к меньшему расстоянию между ближайшими островками), реализуется именно такая ситуация. В случае роста методом СМСЭ всего слоя КТ плотность островков оказывается ниже вследствие меньшего количества центров образования островков на начальном этапе [6].

С нашей точки зрения, наблюдаемые особенности не могут быть объяснены ФЛ, связанной с образованием дислокаций, поскольку изменение технологических параметров приводит к значительному изменению положения пика ФЛ. Тем не менее для прояснения этого вопроса необходимы дальнейшие исследования композиции выращиваемых слоев методами трансмиссионной электронной спектроскопии и температурными исследованиями ФЛ и спектров возбуждения ФЛ, которые позволят объяснить наблюдаемый эффект.

Таким образом, нами продемонстрирована возможность получения ФЛ излучения в диапазоне длин волн $1.3\text{--}1.4 \mu\text{m}$ при комнатной температуре от многослойных структур с КТ в системе InAs/GaAs при использовании комбинации методов МПЭ и СМСЭ для получения слоев КТ. Проведенное нами исследование показывает существенное влияние технологических параметров роста, а именно: числа слоев многослойной

структуры, средней толщины InAs в каждом слое, толщины спейсера, разделяющего слои, — на оптические свойства структур.

Авторы благодарят Д.В. Денисова, Ю.Б. Самсоненко, Д.Н. Демидова и Н.П. Корнееву за участие в ростовых экспериментах, А.Ф. Цацульникова за полезные обсуждения.

Данная работа выполнена при частичной поддержке научной программы "Физика твердотельных наноструктур" (проекты № 98–2029 и 99–2014) и РФФИ (проект № 98–02–18317).

Список литературы

- [1] Seki S., Oohasi H., Sugiura H., Hirono T., Yokoyama K. // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. P. 2192.
- [2] Huffaker D.L., Park G., Zou Z., Shchekin O.B., Deppe D.G. // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. P. 2564.
- [3] Sorapan M., Xin H.P., Tu C.W. // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. P. 994.
- [4] Воловик Б.В., Цацульников А.Ф., Бедарев Д.А., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Малеев Н.А., Мусихин Ю.Г., Суворова А.А., Устинов В.М., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д., Вернер П. // *ФТП.* 1999. Т. 33. С. 990.
- [5] Ковш А.Р., Жуков А.Е., Малеев Н.А., Михрин С.С., Устинов В.М., Цацульников А.Ф., Максимов М.В., Воловик Б.В., Бедарев Д.А., Шерняков Ю.М., Кондратьева Е.Ю., Леденцов Н.Н., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // *ФТП.* 1999. Т. 33. С. 1020.
- [6] Цырлин Г.Э., Поляков Н.К., Егоров В.А., Петров В.Н., Воловик Б.В., Сизов Д.С., Цацульников А.Ф., Устинов В.М. // *Письма в ЖТФ.* 2000. Т. 26. В. 10. С. 46–52.
- [7] Цырлин Г.Э., Голубок А.О., Типисев С.Я., Леденцов Н.Н., Гурьянов Г.М. // *ФТП.* 1995. Т. 29. С. 1697.
- [8] Гурьянов Г.М., Демидов В.Н., Корнеева Н.П., Петров В.Н., Самсоненко Ю.Б., Цырлин Г.Э. // *ЖТФ.* 1997. Т. 67 (8). С. 111.
- [9] Guryanov G.M., Cirlin G.E., Golubok A.O., Tpissev S.Ya., Ledentson N.N., Shchukin V.A., Grundmann M., Bimberg D., Alferov Zh.I. // *Surf. Sci.* 1996. V. 352–354. P. 646.
- [10] Цацульников А.Ф., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Устинов В.М., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Воловик Б.В., Суворова А.А., Берт Н.А., Копьев П.С. // *ФТП.* 1997. Т. 31. С. 851.
- [11] Егоров В.А., Цырлин Г.Э. // *Письма в ЖТФ.* 2000. Т. 26 (5). С. 86.